

Strukturen einzusetzen. Dazu soll ein Prepolymer der inneren Flüssigkeit beigefügt und durch Photopolymerisation vernetzt werden, sodass das nach einer gewissen Zeit radial verkleinerte Startprofil fixiert wird. Andererseits ist es möglich, einen langen dünnen Faden herzustellen, wenn die Fixierung erst im universellen Regime erfolgt.

Eine weitere Anwendung wäre die Unterdrückung von Satellitentropfen. Diese bilden sich in der letzten Phase des universellen Regimes aus dem dünnen Tropfenhals (Abb. d). Wird dieses Regime durch die extremen Viskositätsverhältnisse unterdrückt, entfallen auch die Satellitentropfen. Damit lassen sich Gasblasen einheitlicher Größe in viskosen Medien erzeugen. Das ist hilfreich, wenn beispielsweise Dämmstoffe mit wohl definierten Eigenschaften hergestellt werden sollen.

REINHARD RICHTER

- [1] M. Choptuik, Phys. Rev. Lett. **70**, 9 (1993).
- [2] J. Eggers, Rev. Mod. Phys. **69**, 865 (1997).
- [3] H. C. Lee, IBM J. Res. Dev. **18**, 364 (1974).
- [4] T. A. Kowalewski, Fluid Dyn. Res. **17**, 121 (1996).
- [5] A. Rothert, R. Richter und I. Rehberg, New J. Phys. **5**, 59 (2003).
- [6] P. Doshi, I. Cohen, W. W. Zhang, M. Siegel, P. Howell, O. Basaran und S. R. Nagel, Science **302**, 1185 (2003).
- [7] I. Cohen, M. P. Brenner, J. Eggers und S. R. Nagel, Phys. Rev. Lett. **83**, 1147 (1999).

Leuchtende Wellenfunktion

Nahfeldspektroskopie löst einzelne Exzitonen in Quantenfilmen auf

Quantenmechanische Wellenfunktionen abzubilden ist ein lang gehegtes Ziel vieler Physiker. In den letzten Jahren gelang es z. B., Quantenwirbel in Bose-Einstein-Kondensaten sichtbar zu machen oder stehende Elektronenwellen auf Metalloberflächen, etwa Quantenpferche (*quantum corrals*), mit Raster-Tunnel-Mikroskopen darzustellen.

Exzitonen sind optische Elementaranregungen von Halbleiter-Nanostrukturen. Sie sind an der Lichterzeugung in Leucht- und Laserdioden beteiligt und mögliche Bausteine für zukünftige Quantencomputer. Als sog. Quasiteilchen

bestehen Exzitonen aus einem durch die Coulomb-Wechselwirkung zusammengehaltenen Elektron-Loch-Paar. Ihre Schwerpunkswellenfunktionen lassen sich durch die Schrödinger-Gleichung beschreiben und geben direkt das lokale Dipolmoment und die Wahrscheinlichkeitsamplitude der Photonenemission an. Als „selbstleuchtende Wellenfunktionen“ sollten sie also besonders leicht abzubilden sein. Dennoch haben Exzitonen sich bis jetzt standhaft jedem Versuch widersetzt, ihre Wellenfunktion mit modernen nano-optischen Methoden direkt zu visualisieren. Dies liegt daran, dass alle Halbleiter-Nanostrukturen, auch die besten mittels Molekularstrahl-Epitaxie hergestellten Quantenfilme, einen gewissen Grad an Unordnung aufweisen. Deshalb beträgt die Ausdehnung der Wellenfunktion einzelner Exzitonen zumeist nur einige 10 nm.

Die Arbeitsgruppe um K. Matsuda und T. Saiki berichtet nun, dass es ihr gelungen ist, die Wahrscheinlichkeitsdichte der Schwerpunkswellenfunktion einzelner Exzitonen in einem dünnen Gallium-Arsenid-Quantenfilm sichtbar zu machen [1]. Aufgrund der räumlichen Schwankungen der Dicke des Quantenfilms um wenige Atomlagen sind dabei die Exzitonen lokalisiert und ihre Wellenfunktionen haben eine endliche Ausdehnung (Anderson-Lokalisierung durch Unordnung). Die Forscher beleuchteten die Probe durch eine spezielle von ihnen entwickelte Nahfeldsonde, die einen sehr kleinen Aperturdurchmesser von nur etwa 20 nm (1/40 der Lichtwellenlänge) besitzt. Dennoch weist sie aufgrund ihrer speziellen Geometrie eine hohe Transmissionseffizienz auf. Während diese Spitze über die Probe bewegt wird, wird das von einzelnen Exzitonen emittierte Lumineszenzlicht detektiert (Abb. 1). Dabei wird Lumineszenz immer dann nachgewiesen, wenn sich der nur etwa 30 nm große Lichtfleck unter der Sonde und die lokalisierte Exziton-Wellenfunktion überlappen. Da sich die Emissionswellenlängen verschiedener Eigenzustände aufgrund der Unordnung geringfügig unterscheiden, lässt sich ein Bild der einzelnen Exzitonzustände innerhalb der Quantenfilmebene Pixel für Pixel aus der lokalen, wellenlängenaufgelösten Emissionsstärke aufbauen.

In ihren Quantenfilmen beob-

achten die japanischen Forscher leicht elliptische Formen mit einer mittleren Größe von etwa 100 nm, deutlich oberhalb der räumlichen Auflösung des Experiments. Bei hohen Anregungsleistungen tritt zusätzlich zur exzitonischen Emission auch noch die Emission des biexzitonischen Zustands auf, eines gebundenen „Moleküls“ aus zwei Exzitonen. Interessanterweise ist die Biexziton-Lumineszenz räumlich deutlich weniger ausgedehnt als die des Exzitons. Dies kann der gegenüber dem Exziton reduzierten Ausdehnung der Biexziton-Schwerpunkswellenfunktion zugeschrie-

Dr. Reinhard Richter, Physikalisches Institut, Experimentalphysik V, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth

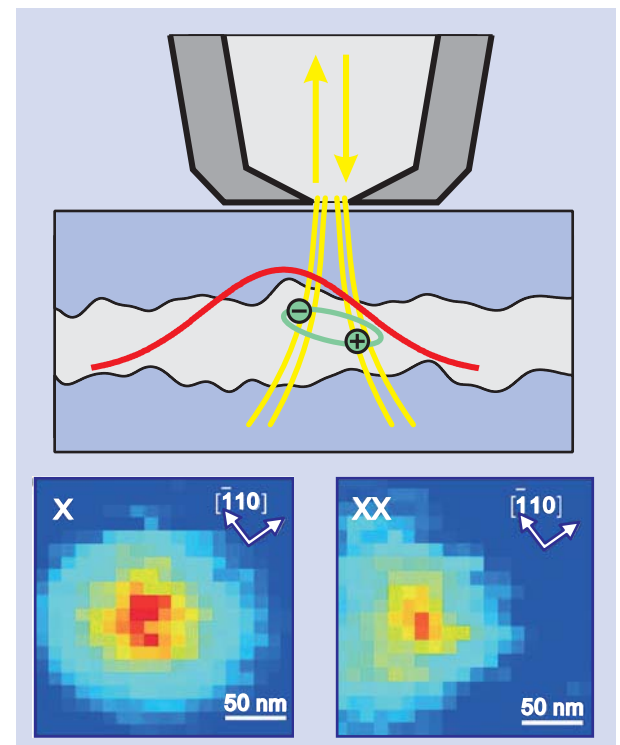


Abb. 1:

- oben: Die gleichmäßig über die Probe bewegte Glasfaserapertur regt die lokalisierten Exziton-Zustände (rot: Wellenfunktion) an und detektiert die beim Exzitonzerfall entstehende Lumineszenz.
- unten: Ist die Lichtaustrittsöffnung klein gegenüber der Wellenfunktion, lässt sich die Wellenfunktion eines einzelnen Exziton- (links) bzw. Biexziton-Zustandes anhand der Intensitätsverteilung der Photolumineszenz räumlich auflösen. (aus [1])

ben werden [1]. Sicher trägt auch bei, dass es sich bei dem Nachweis um ein nichtlineares Experiment handelt – Biexziton-Lumineszenz kann nur an Orten beobachtet werden, an denen sich vorher bereits ein Exziton befand.

Das Experiment von Matsuda et al. ist ein wichtiger weiterer Schritt zum mikroskopischen Verständnis der optischen Eigenschaften von Halbleiter-Nanostrukturen. Es legt eine ganze Reihe weiterführender Experimente nahe. Gerade die exzitonischen Wellenfunktionen von dünnen, ungeordneten Quantenfil-

men weisen eine Reihe sehr interessanter Eigenschaften auf, die neue Einsichten in das Jahrzehnte alte Problem der Anderson-Lokalisierung und damit verbundener Quantenphänomene erlauben [2]. Nur einzelne Zustände im niederenergetischen Teil des Spektrums weisen eine wohl lokalisierte, nahezu gaußförmige Wellenfunktion auf, wie sie in [1] untersucht wurde. Man findet sie in Bereichen, in denen der Quantenfilm zufällig besonders dick ist und die daher als natürliche Quantenpunkte wirken. Energetisch höherliegende Zustände hingegen zeigen kompliziertere, teils fraktale Strukturen (Abb. 2). Speziell die energetischen Korrelationen zwischen räumlich benachbarten lokalisierten Zuständen („Niveau-Abstoßung“) sind von großem praktischem und konzeptionellem Interesse, da sie Aufschlüsse über die Eigenschaften der Grenzflächen liefern. Kürzlich gelang es erstmals, diese Korrelationen nachzuweisen [3]; über die räumliche Struktur der beteiligten Wellenfunktionen war bisher aber experimentell nur wenig bekannt.

Weiterhin eröffnet sich die Möglichkeit, Exzitonen in einzelnen und gekoppelten Quantenpunkten nicht nur abzubilden, sondern auch kohärent zu manipulieren. Dies muss innerhalb der Exziton-Deko-

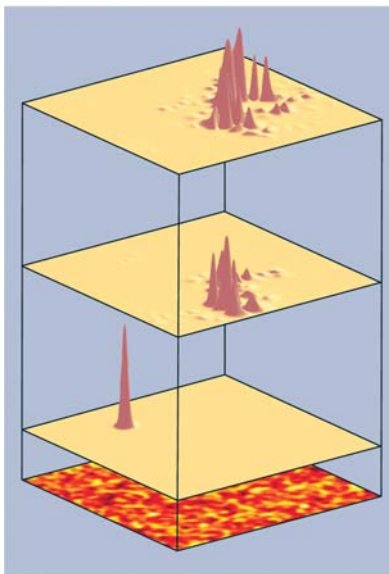


Abb. 2: Numerisch berechnete Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von drei lokalisierten Exzitonenzuständen (im unten dargestellten Unordnungspotential) mit leicht unterschiedlichen Emissionswellenlängen.

härenzzeit von nur wenigen 10 bis 100 ps geschehen. Hier sind in letzter Zeit entscheidende experimentelle Fortschritte gelungen, wie etwa die zeitaufgelöste Untersuchung von optischen Nichtlinearitäten und der Nachweis von Rabi-Oszillationen an einzelnen Quantenpunkten [4, 5] sowie erste quantenlogische Operationen, die auf dem Exziton-Biexziton-Übergang eines einzelnen

Quantenpunkts basieren [6]. Es ist vorstellbar, dass sich mit der in [1] entwickelten Methode nun auch kompliziertere verschränkte Exzitonenzustände in gekoppelten Quantenpunkten anhand der räumlichen Struktur ihrer Wellenfunktion nachweisen lassen. Sollte es gelingen, die räumliche Auflösung noch weiter zu verbessern, eröffnen sich eine Reihe neuer Anwendungen auch jenseits der klassischen Halbleiter, so z. B. zur Abbildung exzitonischer Anregungen in Polymeren oder in molekularen Aggregaten. Den Schlüssel zum Erfolg bildet dabei möglicherweise die sich rasch entwickelnde aperturlose Nahfeldtechnik. Bereits die jetzt vorgestellten Experimente von Matsuda et al. erfordern aber zu ihrer quantitativen Interpretation ein verbessertes Verständnis des Messprozesses und der Grundfrage, was es überhaupt heißt, eine Wellenfunktion sichtbar zu machen.

CHRISTOPH LIENAU UND
ERICH RUNGE

- [1] K. Matsuda et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 177401 (2003)
- [2] E. Runge, Solid State Physics **57**, 149 (2002)
- [3] F. Intonti et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 076801 (2001)
- [4] T. Guenther et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 057401 (2002)
- [5] A. Zrenner et al., Nature **418**, 612 (2002)
- [6] X. Li et al., Science **301**, 809 (2003)

KURZGEFASST...

■ Bose-Einstein-Kondensation mit Fermionen

Fermionen gehorchen nicht der Bose-Statistik und können daher auch kein Bose-Einstein-Kondensat bilden. Soweit, so gut. Aber so wie sich Elektronen (Fermionen) in einem Supraleiter zu Cooper-Paaren (Bosonen) zusammenfinden, die dann kondensieren, wurde schon länger darüber spekuliert, dass fermionische Atome über den „Umweg“ von zweiatomigen Molekülen ebenfalls ein Kondensat bilden können. Die Arbeitsgruppen von Rudi Grimm an der Uni Innsbruck sowie von Deborah Jin am NIST in Boulder, Colorado, haben nun, ausgehend von ${}^6\text{Li}$ - bzw. ${}^{40}\text{K}$ -Atomen, unabhängig voneinander ein solches Molekülkondensat erzeugt, indem sie eine sog. Feshbach-Resonanz ausnutzten, um die Atom-Atom-Wechselwirkung zu variieren.¹⁾ In einem der nächsten Hefte des Physik Journals wird ein ausführlicher Artikel über Molekülkondensate erscheinen.

■ Neuigkeiten von B-Mesonen

Nachdem vor ein paar Monaten ein neues Teilchen mit fünf Quarks für Aufruhr im Teilchenzoo gesorgt hat, hat die Belle-Kol-

laboration am KEK-Labor in Japan nun ein neues Teilchen entdeckt, das möglicherweise aus vier Quarks besteht.²⁾ $X(3872)$ entsteht beim Zerfall von B-Mesonen. Seine Existenz wurde inzwischen am Fermilab bestätigt, es fügt sich aber nicht in das bekannte Teilchenschema ein. Ebenfalls am KEK untersuchten A. Go und Kollegen erstmals in einem Experiment der Teilchenphysik die von der Quantenmechanik implizierten nichtlokalen Korrelationen zwischen Paaren von B-Mesonen und ihren Antiteilchen.³⁾ Erwartungsgemäß verletzen diese Korrelationen die sog. Bellschen Ungleichungen, sodass das experimentelle Ergebnis konform ist mit der Quantentheorie.

■ Scharfer Fokus

Gewöhnliches Licht lässt sich nur auf einen Fleck von der Größenordnung der Wellenlänge fokussieren – weniger ist nicht drin. Es sei denn, man verwendet polarisiertes Licht. Gerd Leuchs und seine Mitarbeiter an der Uni Erlangen-Nürnberg haben gezeigt, dass sich radial polarisiertes Licht eines HeNe-Lasers auf einen Fleck von nur $0,16 \lambda^2$ (λ : Wellenlänge) fokussieren lässt.⁴⁾ Bei einer radial polarisierten Feldmode ist

das Feld lokal linear polarisiert, die Polarisationsrichtung ist jedoch über den Strahlquerschnitt nicht konstant, sondern zeigt stets in eine radiale Richtung. Möglicherweise ließe sich damit das Auflösungsvermögen in der optischen Lithographie steigern.

■ Lichtblitze vom Schwarzen Loch

Beim Blick auf das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße hat Reinhard Genzel vom MPI für extraterrestrische Physik in Garching kürzlich gemeinsam mit internationalen Kollegen Lichtblitze im infraroten Spektralbereich registriert.⁵⁾ Sie vermuten, dass dieses Licht emittiert wird, wenn Gas in das Schwarze Loch gesogen und dabei stark erhitzt wird. Die Periodizität von 17 Minuten deutet darauf hin, dass das Schwarze Loch rasch rotiert – wie von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie vorausgesagt.

1) S. Jochim et al., 10.1126/science.1095280 (Science Express Reports); M. Greiner et al., Nature **426**, 537 (2003)

2) S.-K. Choi et al., arxiv.org/abs/hep-ex/0309032

3) A. Go et al., arxiv.org/abs/quant-ph/0310192

4) R. Dorn et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 235901 (2003)

5) R. Genzel et al., Nature **425**, 934 (2003)